



## Analysis of the Signal Parameters Measurement Uncertainty at Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing

Yurii KUTS, Anatoliy PROTASOV, Iuliia LYSENKO, Oleksandr DUGIN

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

Phone: +38 044 2049547, Fax: +38 044 4068501;

e-mail: [y.kuts@ukr.net](mailto:y.kuts@ukr.net), [a.g.protasov@gmail.com](mailto:a.g.protasov@gmail.com), [j.lysenko@kpi.ua](mailto:j.lysenko@kpi.ua), [duginos@gmail.com](mailto:duginos@gmail.com)

### Abstract

The purpose of this paper has been to obtain and analyze analytical expressions of the standard uncertainty of the measurement the decrement and the oscillations frequency of the eddy current transducer signal in pulse mode excitation. Analysis of obtained expressions made possible to determinate and justify the conditions for choosing a time interval for analyzing the eddy current transducer signals in order to minimize these uncertainties. The results of the conducted experiments are given. Taking into the condition of obtaining the minimum error for evaluating the trends of the signal characteristics, the accuracy of measuring the transducer signal decrement and natural oscillation frequency increases to two times.

**Keywords:** eddy current, transducer pulsed excitation mode, signal characteristics, amplitude value, signal decrement, frequency

## Анализ неопределенности измерения параметров сигналов импульсного вихретокового неразрушающего контроля

Юрий КУЦ, Анатолий ПРОТАСОВ, Юлия ЛИСЕНКО, Олександр ДУГИН

### 1. Введение

Вихретоковый неразрушающий контроль (ВТНК) широко применяется в различных областях науки и техники для решения задач дефектоскопии, контроля качества материалов и изделий, мониторинга характеристик объектов контроля (ОК) различного назначения. Его популярность обусловлена высокой эффективностью и надежностью результатов. Современное развитие ВТНК сосредоточено на решении задач совершенствования вихретоковых преобразователей (ВТП), способов возбуждения вихревых токов в ОК, разработки новых методов обработки информационных сигналов и т.п. [1, 2].

С целью повышения информативности вихретокового контроля и расширения его совместного использования различных методов ВТНК, в частности методов, основанных на импульсном возбуждении вихревых токов. В подавляющем большинстве исследований импульсного ВТНК используемые информативные параметры сигналов связаны с его характерными точками. К таким параметрам относятся положение на временной оси моментов пересечения сигналом определенного уровня, временные интервалы между узловыми точками, максимальное значение амплитуды сигнала и т.п. [3-5]. Формирование результатов контроля по отдельным значениям сигнала ВТП свидетельствует о неполном использовании информационных возможностей сигнала и является одой из причин низкой достоверности контроля. В связи с этим актуальными вопросами являются повышение информативности и достоверности ВТНК на основе

дальнейшего исследования импульсного ВТНК, поиска новых информативных параметров и характеристик сигналов ВТП, а также совершенствования методов и средств их анализа и оценки показателей точности [6].

Концепция неопределенности измерений активно используется в метрологической практике для количественного оценивания точности результатов измерений физических величин [7]. На сегодня ее применение в ряде технических приложений еще не получило должного распространения. Это касается и области ВТНК материалов и изделий. Одной из причин этого, на наш взгляд, является недостаточное количество методик и примеров расчета неопределенностей для различных практических задач.

Точность измерения параметров сигналов ВТП оказывает существенное влияние на результаты контроля [8]. В случае импульсного возбуждения сигналы ВТП, при определенных условиях, представляются синусоидальным затухающим колебанием с характерными для него параметрами – частотой собственных колебаний и коэффициентом затухания. Методы цифровой обработки сигналов позволяют проводить определение таких параметров сигналов ВТП на основе оценок амплитудной и фазовой характеристик этих сигналов (АХС и ФХС), полученных с помощью дискретного преобразования Гильберта (ДПГ). Процесс оценивания информативных параметров сигналов ВТП сопровождается возникновением как случайной составляющей погрешности, обусловленной действием шумов и помех различной природы, так и методической составляющей, которая определяется особенностями применяемых цифровых методов анализа сигналов и режимов получения экспериментальных данных [9].

Целью данной работы является получение и анализ аналитических выражений стандартной неопределенности результатов определения декремента и частоты колебаний сигнала ВТП в импульсном режиме в задачах контроля электропроводящих материалов и изделий из них.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1 Структура экспериментального макета

На рис. 1 приведена структура разработанной системы ВТНК, которая состоит из ВТП, генератора (Г), цифрового осциллографа (ЦО), цифрового интерфейса (ЦИ), персонального компьютера (ПК) с оригинальным программно-алгоритмическим обеспечением (ПО).

Алгоритмом работы системы предусмотрено выделение сигналов ВТП, определение дискретных АХС и ФХС и их последующий анализ [8]. Применение ДПГ позволяет сформировать выборку данных значительного объема в небольшом временном интервале.

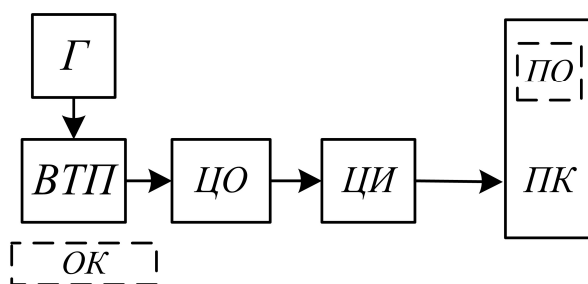


Рис. 1 – Структура экспериментального макета системы

Полученные таким образом характеристики сигналов необходимы для экспериментального определения таких информативных признаков, как декремент и частота собственных колебаний.

Исследования проводились для двух типов накладных ВТП – параметрического и трансформаторного мультидифференциального. От генератора на ВТП поступал возбуждающий импульсный сигнал (амплитудой 5 В, периодом повторения  $T = 5$  мкс, длительностью импульса  $\tau = 2$  мкс). Преобразователь включался в измерительную цепь, на выходе которого формировался информационный сигнал в виде напряжения. Этот сигнал рассматривался как реакция ВТП на фронт возбуждающего импульса, что позволяло устранять влияние этого фронта на информационный сигнал. Фрагмент сигнала ВТП имеет вид затухающих гармонических колебаний (рис. 2).

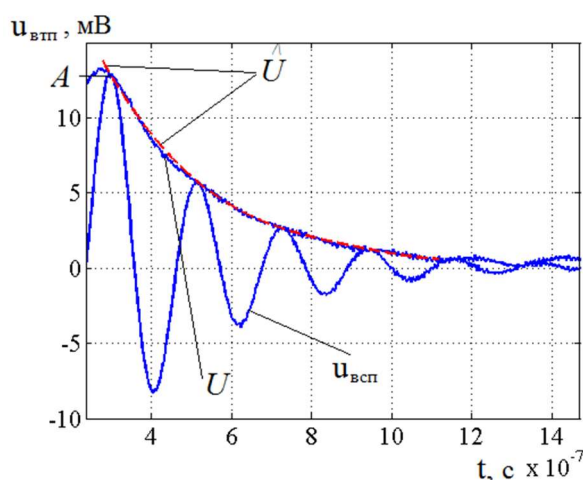


Рис. 2 – Фрагмент сигнала ВТП

## 2.2 Описание объекта контроля

В качестве ОК для проведения экспериментальных исследований использованы две пластины толщиной 5 мм, длиной 100 мм, шириной 30 мм (рис. 3).



Рис. 3 – Объект контроля

Образец S-1 изготовлен из стали марки Ст.20 ( $\mu > 1$ ), а S-2 из алюминиевого сплава Д16 ( $\mu = 1$ ). На одной из поверхностей обоих образцов с одинаковым интервалом расположены три искусственных дефекта, имитирующие поверхностные трещины, шириной 0.2 мм и глубиной  $\delta = \{0.2, 0.5, 1.0\}$  мм. Шероховатость рабочей поверхности не превышала 1,6 мкм.

### 2.3 Алгоритм обработки сигналов

Модель сигнала ВТП (рис. 2) в общем виде представлялась аддитивной смесью затухающих гармонических колебаний и гауссового шума:

$$u_{\text{ВТП}}(t, \delta) = A \cdot e^{-\alpha(\delta)t} \cos(2\pi f(\delta) \cdot t) + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2) \quad (1)$$

где  $A$  – амплитудное значение сигнала ВТП,  $\alpha(\delta)$  – декремент сигнала,  $f(\delta)$  – частота собственных колебаний сигнала,  $t$  – текущее время,  $(t_1, t_2)$  – интервал времени анализа сигнала ВТП,  $u_{\text{ш}}(t)$  – шумовая составляющая сигнала, которая рассматривалась как реализация гауссового случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ .

Порядок обработки и анализа характеристик информационных сигналов ВТП с импульсным возбуждением включал такие этапы:

- получение выборки  $u_{\text{ВТП}}[j, \delta]$ ;
- определение гильберт-образа выборки  $u_{\text{ВТП}}[j, \delta]$

$$u_H[j, \delta] = \mathbf{H}[u_{\text{ВТП}}[j, \delta]] \quad (2)$$

где  $j$  – номер отсчета сигнала ВТП в цифровом представлении,  $\mathbf{H}$  – оператор преобразования Гильберта;

- определение дискретных ФХС и АХС ВТП:

$$\hat{U}[j, \delta] = \sqrt{u_{\text{ВТП}}^2[j, \delta] + u_H^2[j, \delta]}, \quad (3)$$

$$\hat{\Phi}[j, \delta] = \arctg \frac{u_H[j, \delta]}{u_{\text{ВТП}}[j, \delta]} + \mathbf{L}(u_H[j, \delta], u_{\text{ВТП}}[j, \delta]), \quad (4)$$

где  $\mathbf{L}$  – оператор разворачивания ФХС за пределы интервала однозначности функции  $\arctg$ ;

- экспоненциальная аппроксимация функции (3) для повышения точности определения коэффициента затухания сигнала ВТП (учитывался участок АХС, соответствующий первым периодам информационного сигнала ВТП, т.е. периодам с наибольшей крутизной АХС, рис. 2);

- определение коэффициента затухания сигналов ВТП по формуле:

$$\alpha(\delta) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', \delta)}{\hat{U}(t_2', \delta)}. \quad (5)$$

где  $\hat{U}(t_1', \delta), \hat{U}(t_2', \delta)$  – значения аппроксимированных кривых в моменты времени  $t_1'$  и  $t_2'$ ,  $\Delta T = t_2' - t_1'$ ;

- сглаживание функции (4) по методу определения линейной регрессии Бартлетта-Кенуя [8].

- определение частоты сигналов ВТП по линейному тренду функции (4):

$$f(\delta) = \Delta \hat{\Phi}[\Delta T, \delta] / 2\pi \Delta T, \quad (6)$$

где  $\Delta\hat{\Phi}[\Delta T, \delta]$  – накопленная за время  $\Delta T = t_2 - t_1$  фаза сигнала ВТП, определенная по функции линейной регрессии;

– анализ полученных результатов.

## **2.4 Анализ стандартной неопределенности измерения характеристик сигналов ВСП**

Для реальных условий эксперимента, когда погрешность временного интервала  $\Delta T$  определяется, в основном, стабильностью генератора тактовых импульсов и может быть сведена к пренебрежимо малой величине, а грубая погрешность определения фазовой характеристики сигнала отсутствует (ступенчатая функция  $L[\cdot]$  определяется без погрешности), получены стандартные неопределенности результатов измерения частоты собственных колебаний и затухания сигнала ВТП:

$$u_f = \frac{u}{2\pi\Delta T\hat{U}_1} \sqrt{1 + e^{2\cdot\alpha\Delta T}}, \quad (7)$$

$$u_\alpha = \frac{u}{\Delta T\hat{U}_1} \sqrt{1 + e^{2\cdot\alpha\Delta T}}, \quad (8)$$

где  $u$  – стандартная неопределенность оценок значений сигналов ВСП. При выводе формул (7), (8) учтено, что сигнал и его гильберт-образ в совпадающие моменты времени некоррелированы.

Анализ полученных трансцендентных уравнений (7), (8) показал, что функции  $u_f(\Delta T)$  и  $u_\alpha(\Delta T)$  имеют минимумы для значения  $\alpha\Delta T \approx 1,10889$ . С учетом этого получены выражения для минимальных значений стандартных неопределенностей:

$$u_{f \min} \approx \frac{u}{2\Delta T\hat{U}_1}, \quad (9)$$

$$u_{\alpha \min} \approx \frac{\pi u}{2\Delta T\hat{U}_1}. \quad (10)$$

Таким образом, проведенный анализ погрешностей определения частоты собственных колебаний и коэффициента затухания сигнала ВТП позволил оценить оптимальное время анализа сигнала вида (1), что может существенно повлиять на достоверность результатов контроля в условиях действия помех и шумов.

## **3. Обсуждение экспериментальных результатов**

### **3.1 Исследование работы мультидифференциального ВТП**

Результаты анализа изменения затухания и частоты сигнала ВТП для двух образцов приведены, соответственно, на рис. 4а и 4б. Анализ этих графиков показывает, что для ОК из различных материалов наблюдается различная зависимость коэффициента затухания от глубины трещины, что может быть использовано для оценивания физико-механических параметров материала ОК. Зависимость  $f(\delta)$  близка к линейной и имеет тенденцию к уменьшению частоты с увеличением глубины трещины  $\delta$ .

В процессе анализа экспериментальных результатов использовано условие получения минимальной погрешности определения информативных параметров сигнала ВТП.

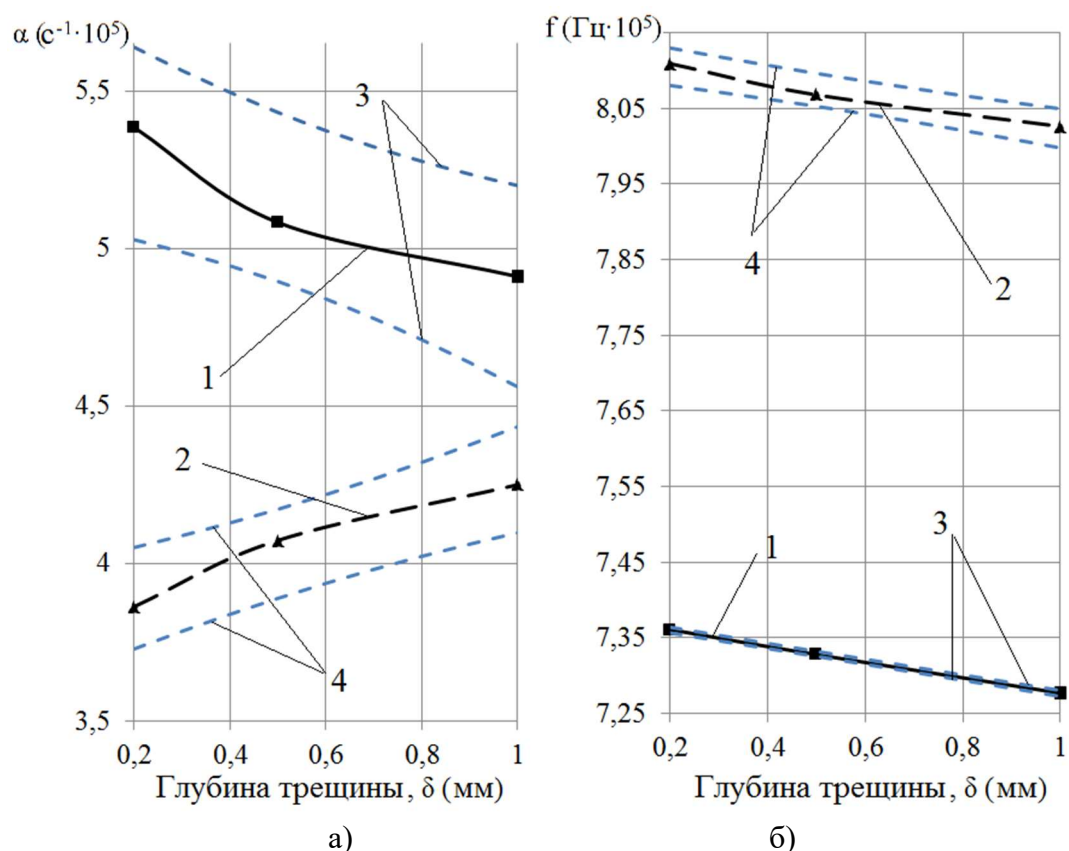


Рис. 4 – Зависимость затухания (а) и частоты (б) сигнала мультидифференциального ВТП для образца S-1 (кривая 1) и S-2 (кривая 2) и границы их доверительных интервалов (кривые 3 и 4, соответственно)

### 3.2 Исследование работы параметрического ВТП

Результаты анализа затухания сигнала параметрического ВТП при его импульсном возбуждении для двух образцов приведены на рис. 5а (кривая 1 - для образца S-1, кривая 2 – для образца S-2). Из графиков видно, что характер зависимости затухания сигнала ВТП от глубины трещины ОК близок к линейному и имеет отличные значения в зависимости от физико-механических характеристик материала ОК (в частности электропроводности и магнитной проницаемости).

Анализ графиков на рис. 5а показывает, что затухание как информативный параметр может быть использован для контроля и оценки глубины трещины в ОК. В проведенных экспериментах относительная погрешность определения глубины трещины не превышала  $\pm 0.5\%$ , а средняя чувствительность к глубине трещин для образцов S-1 и S-2 оценена соответственно как  $S_{\alpha\_S1} = 0.2 \text{ мкс}^{-1}/\text{мм}$  и  $S_{\alpha\_S2} = 0.1 \text{ мкс}^{-1}/\text{мм}$ , то есть выше для немагнитного материала.

На рис. 5б приведены результаты определения изменения частоты собственных колебаний сигнала ВСП с импульсным возбуждением как функции от глубины трещины в образце S-1 (кривая 1) и S-2 (кривая 2). Графики зависимости  $f(\delta)$  имеют линейный характер, а значение частоты собственных колебаний ВТП уменьшаются с увеличением глубины трещины в обоих образцах.

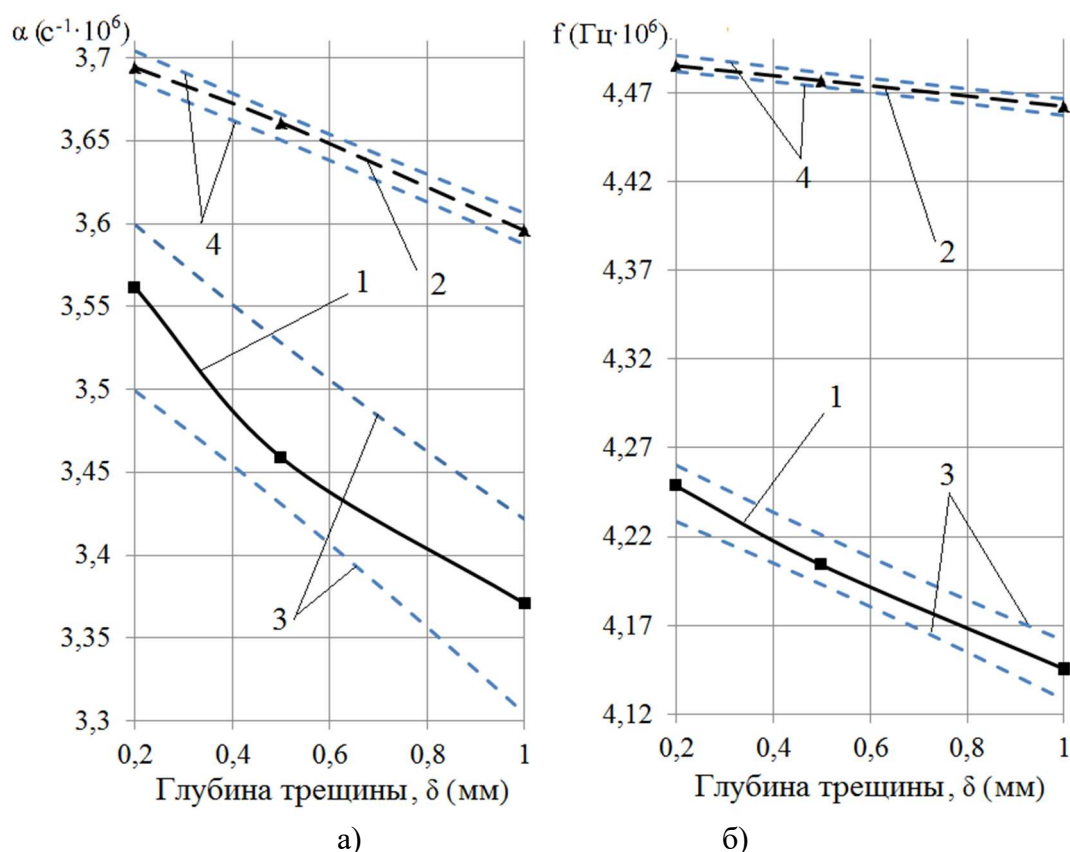


Рис. 5 – Зависимость затухания (а) и частоты (б) сигнала параметрического ВТП для образца S-1 (кривая 1) и S-2 (кривая 2) и границы их доверительных интервалов (кривые 3 и 4 соответственно)

## 4. Заключение

В работе получены аналитические выражения для стандартных неопределенностей результатов измерения частоты собственных колебаний и затухания сигнала ВТП, работающего в режиме с импульсным возбуждением. Анализ этих выражений позволил получить и обосновать условия выбора временного интервала анализа сигналов ВТП для минимизации этих неопределенностей. Установлено, что для получения минимальной погрешности определения коэффициента затухания  $\alpha$  и частоты собственных колебаний  $f$  сигнала, необходимо время анализа этого сигнала составляет  $\Delta T \approx 1.1089/\alpha$ .

Результаты проведенных экспериментов показали, что точность определения коэффициента затухания и собственных колебаний сигнала ВСП с учетом условия получения минимальной погрешности при определении трендов характеристик сигнала повышается в полтора – два раза.

## Литература

1. Тетерко А.Я., З.Т. Назарчук. Селективна вихрострумова дефектоскопія. НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, Львов, 2004, 247 с.
2. Bazhenov V., A. Protasov, K. Gloinik. Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer. MRRS 2017 – Proceedings of the 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, 8075051, pp. 155-158.

3. Vasic D, V. Bilas, D. Ambrus. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 53, no. 4, 2004, pp.1289-1294.
4. Adewale I. G.Y. Tian. Decoupling the Influence of Permeability and Conductivity in Pulsed Eddy-Current Measurements. IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 3, 2013, pp.1119-1127.
5. Yating Y., D. Pingan, Y. Tuo. Investigation on contribution of conductivity and permeability on electrical runout of eddy current displacement sensor. Proc. IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf., 2011.
6. Kuts Y., A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin, O. Bliznuk, V. Uchanin. Using multidifferential transducer for pulsed eddy current object inspection. IEEE 1st Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering, 2017, pp. 826-829.
7. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: ISO, 1993, 101 p.
8. Lysenko I., Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation. The e-Journal of Nondestructive Testing, 2016, vol. 21, no. 7, Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 05.05.18).
9. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition, JCGM, Switzerland, 1993, 120 p.